

mgr inż. Monika Chudyba
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Streszczenie rozprawy doktorskiej pt. „Energetyczna zdolność rozdzielcza segmentowanych detektorów półprzewodnikowych promieniowania X”

Pozycjoczułe detektory krzemowe są szeroko stosowane w badaniach naukowych oraz rutynowej diagnostyce materiałów wykorzystujących metody rozpraszania promieniowania X, w tym w radiografii i dyfrakcji rentgenowskiej, jak również w technikach spektrometrycznych, np. rentgenowskiej analizie fluorescencyjnej. Szczególnie intensywnie rozwijanym w ostatnich latach obszarem zastosowań tego typu detektorów są eksperymenty wykorzystujące promieniowanie synchrotronowe. Kolejnym potencjalnym zastosowaniem dla pozycjoczułych sensorów jest obrazowanie medyczne, aczkolwiek prace nad optymalizacją konstrukcji detektorów w tej dziedzinie są ciągle w fazie prac badawczo-rozwojowych.

Podstawowe koncepcje i technologie krzemowych detektorów pozycjoczułych zostały opracowane w odpowiedzi na wymagania eksperymentów fizyki cząstek elementarnych. W eksperymentach tych do rejestracji torów cząstek stosowane są zarówno detektory jednowymiarowe (paskowe) jak również detektory dwuwymiarowe (pikselowe). Rozwój detektorów promieniowania X bazuje na tych koncepcjach, ale stanowi oddzielną gałąź prac badawczo-rozwojowych ze względu na specyficzne, wymagania dotyczące funkcjonalności zarówno samych sensorów jak i elektroniki odczytu. W ostatnich latach rośnie pole zastosowań spektralnych technik obrazowania z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego i zapotrzebowanie na odpowiednie do takich technik moduły detekcyjne, czyli detektory umożliwiające równoczesne obrazowanie przestrzenne i spektrometrię promieniowania X.

Obecnie używane detektory pozycjoczułe posiadają przestrzenną zdolność rozdzielczą na poziomie 50 μm i pozwalają na mierzenie rozkładów przestrzennych strumieni fotonów X bez informacji o ich energiach. Natomiast detektory dedykowane do spektrometrii wysokiej rozdzielczości oferują obecnie energetyczne zdolności rozdzielcze na poziomie 125 eV FWHM dla linii 5.9 keV, jednak z punktu widzenia pomiarów przestrzennych są detektorami punktowymi, albo 0-wymiarowymi, tzn. nie dostarczają żadnej informacji przestrzennej. Dotychczasowe prace nad rozszerzeniem funkcjonalności typowych detektorów pikselowych o pomiary spektrometryczne pozwoliły uzyskać energetyczne zdolności rozdzielcze na poziomie 1 keV FWHM dla piku 5.9 keV, podczas gdy do efektywnego wykorzystania techniki obrazowania fluorescencyjnego potrzebny byłby detektor o energetycznej zdolności rozdzielczej na poziomie 200 eV FWHM dla linii 5.9 keV. Drugim istotnym parametrem, oprócz energetycznej zdolności rozdzielczej, jest poziom tła niskoenergetycznego wyznaczający granicę ilościowej wykrywalności poszczególnych pierwiastków w analizie fluorescencyjnej. Parametr ten jest zwykle definiowany jako stosunek piku 5.9 keV do tła niskoenergetycznego i dla specjalistycznych detektorów spektrometrycznych osiąga poziom 10^4 . W detektorach pozycjoczułych wielkość ta jest o rzędy wielkości mniejsza ze względu na efekty podziału ładunku.

Celem pracy jest analiza zjawisk fizycznych odpowiedzialnych za ograniczenia energetycznej zdolności rozdzielczej w detektorach pozycjoczułych oraz testy detektorów prototypowych rozwijanych w Katedrze Oddziaływań i Detekcji Cząstek. Szczegółowe pomiary efektów odpowiedzialnych za degradację energetycznej zdolności rozdzielczej były możliwe po zastosowaniu układów elektroniki odczytu o odpowiednio niskim poziomie szumów. Układy takie, w postaci wielokanałowych specjalizowanych układów scalonych, zostały opracowane w Katedrze Oddziaływań i Detekcji Cząstek i wykorzystane do odczytu prototypowych sensorów padowych. Dla prototypowych sensorów o różnych wymiarach padów: $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$, $750\ \mu\text{m} \times 750\ \mu\text{m}$, $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ i odstępach pomiędzy padami: $50\ \mu\text{m}$ i $100\ \mu\text{m}$ wykonano pomiary widm energetycznych dla różnych napięć polaryzacji, temperatury i strony oświetlenia detektora przez promieniowanie X. Widma zebrane przy użyciu niskoszumowej elektroniki odczytu umożliwiły separację efektów związanych z fluktuacjami Fano, efektów podziału ładunku oraz szumów elektroniki. Wykonane badania potwierdziły możliwość uzyskania całkowitej szerokości piku poniżej $200\ \text{eV FWHM}$ dla energii $5.9\ \text{keV}$ w temperaturze pokojowej dla padów o wymiarach $500 \times 500\ \mu\text{m}^2$.

Analiza efektów podziału ładunku pomiędzy sąsiadujące pady pokazała, że źródłem niskoenergetycznego tła rejestrowanego promieniowania są nie tylko efekty podziału ładunku, ale również efekty niekompletnego zbierania ładunku w obszarze złącza p⁺-n. W celu zweryfikowania tej hipotezy zostały wykonane testy dla sensorów o różnych głębokościach warstwy p⁺: $1.2\ \mu\text{m}$, $200\ \text{nm}$ oraz $100\ \text{nm}$. Pomiary widm energetycznych pokazały, że poziom tła niskoenergetycznego można zredukować przez zastosowanie płytkiego złącza. Dla sensorów o głębokości warstwy p⁺ równej $100\ \text{nm}$ uzyskano poziom piku do tła rzędu 3.33×10^3 , podczas gdy dla standardowych sensorów o głębokości warstwy p⁺ równej $1.2\ \mu\text{m}$ stosunek ten jest na poziomie 1×10^3 dla widm ze źródła Fe-55. Wyniki te zostały potwierdzone symulacjami z wykorzystaniem specjalistycznego pakietu TCAD Sentaurus, stosowanego do modelowania przyrządów półprzewodnikowych.

Zbadano również wpływ uszkodzeń radiacyjnych, indukowanych przez miękkie promieniowanie X, na parametry detektorów. Spodziewane jest, że defekty generowane w obszarach izolatora pomiędzy padami będą powodować wzrost prądu upływu sensora. Testy wykazały, że prąd upływu w trakcie naświetlania do całkowitej dawki $320\ \text{Gy}(\text{SiO}_2)$ wzrósł o jeden rząd wielkości. Szerokość połówkowa piku $5.9\ \text{keV}$ wzrosła o około $50\ \text{eV}$, co jest spójne z oczekiwanym wzrostem ekwiwalentnego ładunku szumowego spowodowanym szumem śrutowym prądu upływu detektora.

Przeprowadzone badania dla różnych geometrii sensorów i różnych ustawień elektroniki odczytu pozwoliły na sformułowanie ogólnych rekomendacji dotyczących optymalizacji energetycznej zdolności rozdzielczej. Wyniki eksperymentalne pozwolą na ekstrapolowanie analizowanych modeli dla innych segmentacji sensora, w szczególności w kierunku mniejszych padów dla zastosowań, dla których wysoka przestrzenna zdolność rozdzielcza jest wiodącym wymaganiem.

Kraków, 29.07.2020